

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



ارائه یک روش طراحی برای دیوارههای میخ‌گذاری‌شده و مقایسه آن با روش طراحی سنتی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.76614.1142

محمد حاذقیان[۱]

چکیده *در روش طراحی سنتی برای دیوارهای میخ‌گذاری‌شده که مبتنی بر راهنمای FHWA است، معمولاً مشخصات طراحی میخ‌ها (طول، فاصله و قطر میخ‌ها) در عمق گود ثابت فرض می‌شود. اما در روش طراحی معرفی‌شده در مطالعه حاضر (روش طراحی پیشنهادی) با کنترل گام‌به‌گام ضریب اطمینان برای هریک از ردیف‌های میخ از بالا به پایین گود، مشخصات طراحی آنها در عمق تغییر داده می‌شود. در مطالعه حاضر، ابتدا فرضیات مدل‌سازی بیان و سپس روش مدل‌سازی عددی با آزمون پروژه کلوتره صحت‌سنجی می‌شود. در ادامه جزئیات روش‌های طراحی سنتی و پیشنهادی توصیف می‌شود. سپس یک مطالعه پارامتری برای مقایسه روش‌های طراحی سنتی و پیشنهادی انجام می‌شود. در این مطالعه پارامتری، اثر عمق گود، تراکم خاک، چسبندگی خاک، سربار و ضریب اطمینان پایداری موردنیاز بررسی می‌شود. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که روش طراحی پیشنهادی نسبت‌به سنتی، چگالی حجمی میخ‌ها (مجموع حجم میخ‌ها تقسیم بر مساحت دیواره) را به‌طور متوسط ۳۰٪ کاهش می‌دهد که از لحاظ اقتصادی قابل توجه است. هم‌چنین نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تغییرشکل تاج دیواره گود در روش طراحی پیشنهادی نسبت‌به سنتی به‌طور متوسط حدود ۱۰٪ بیشتر است.*

واژه‌های کلیدی گود، میخ‌گذاری، روش طراحی سنتی، روش طراحی پیشنهادی، چگالی حجمی میخ‌ها و FLAC3D.

Proposal of a Design Method for Soil-Nailed Walls and Compare it with the Conventional Design Method

Mohammad Hazeghian

Abstract *In the conventional design method for soil-nailed walls that is based on the FHWA guidance, the nails properties (the length, spacing and diameter of nails) through the excavation depth is usually assumed constant. However, in the design method introduced in the present study (the proposed design method), the nails properties are varied through the excavation depth by step-by-step control of the factor of safety for each row of nails. In the present study, first numerical assumptions are explained and then the numerical modelling methodology is verified through the Clouterre project. Afterwards, the details of the conventional and proposed design methods are described. Next, a parametric study is performed to compare the conventional and proposed design methods. In the parametric study, the effects of the excavation depth, soil density, soil cohesion, surcharge and required factor of safety are investigated. The results of the present study show that the proposed design method compared with the conventional one would decrease on average 30% the nails volumetric density (i.e. the volume of nails divided by the wall area), which is considerable from the economical point of view. Moreover, the results show that the total displacement at the wall crest for the proposed design method is comparatively 10% higher than that of the conventional design method.*

Keywords Excavation, soil nailing, Conventional design method, Proposed design method, Nails volumetric density and FLAC3D.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۲/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/٤/۲۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

Email: m.hazeghian@yazd.ac.ir

مقدمه

پایدارسازی شیروانی‌ها و گودها از لحاظ فنی، اقتصادی و ایمنی بسیار حایز اهمیت است. روش‌های متعددی مانند دیوارهای حائل، شمع‌های درجا و کوبشی، میخ‌گذاری، مهارگذاری و... برای پایدارسازی شیروانی‌ها و گودها پیشنهاد شده و مورداستفاده قرار گرفته‌است. در این میان، روش میخ‌گذاری از محبوبیت خاصی به‌خصوص در کشور ایران برخوردار است.

روش میخ‌گذاری برای اولین بار توسط مهندسان اتریشی برای پایدارسازی دیواره‌های یک تونل به‌کار رفت. پس از آن، این روش به‌دلیل سادگی اجرا و اقتصادی بودن در سطح جهان موردتوجه قرار گرفت. در دهه اخیر، پایدارسازی شیروانی‌ها و گودها با استفاده از روش میخ‌گذاری بسیار گسترش یافته‌است [1].

در طراحی دیواره‌های میخ‌گذاری‌شده، طراحان همواره اقتصاد پروژه را در نظر می‌گیرند و تلاش می‌کنند با استفاده از روش‌های متفاوت و تغییر در پارامترهای طراحی شامل طول، زاویه، قطر و آرایش میخ‌ها، یک طرح بهینه از لحاظ اقتصادی ارائه دهند. تحقیق‌های متعددی در ارتباط با بهینه‌سازی طرح دیواره‌های میخ‌گذاری انجام شده‌است [9-2]. در این مطالعه‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای مختلف شامل زاویه میخ‌ها، طول میخ‌ها و آرایش آنها مورد بررسی قرار گرفته‌است.

با استفاده از روش تعادل حدی و روابط ارائه‌شده در راهنمای FHWA، به مطالعه تأثیر عوامل مختلف شامل طول، قطر و فاصله میخ‌ها بر زاویه بهینه میخ‌ها پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش قطر میخ‌ها تا یک مقدار مشخص، زاویه بهینه میخ‌ها افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، زاویه بهینه میخ‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، [2] نشان دادند که افزایش چسبندگی خاک (با فرض زاویه اصطکاک داخلی ثابت) تا یک مقدار مشخص موجب کاهش زاویه بهینه میخ‌ها می‌شود اما افزایش بیشتر آن تأثیری چندانی بر زاویه بهینه میخ‌ها ندارد. [7] با استفاده از روش ژامبوی تعمیم‌یافته حداقل نیروی لازم در میخ‌ها برای دستیابی به یک ضریب اطمینان مجاز را تعیین کردند. [8] بهینه‌سازی طرح میخ‌گذاری را به‌صورت جامعی با در نظر گرفتن تمام عوامل مرتبط مانند طول، زاویه، قطر و فاصله میخ‌ها به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. [8,7] سطح گسیختگی بحرانی برای دیواره میخ‌گذاری شده را سطح گسیختگی آن بدون مسلح‌سازی در نظر گرفتند که فرض درستی نیست چراکه سطح گسیختگی بحرانی با حضور میخ‌ها تغییر می‌کند. [10] با به‌کارگیری روش المان محدود غیرخطی و کاهش مقاومت، آرایش بهینه میخ‌ها برای شیروانی‌های میخ‌گذاری‌شده با هندسه‌های متفاوت را تعیین کردند. آنها نتیجه گرفتند که زاویه بهینه میخ‌ها با افزایش زاویه شیب دامنه شیروانی افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند که برای دیواره‌های قائم، زاویه بهینه میخ‌ها صفر درجه است. البته آنها پیشنهاد دادند اگر میخ‌ها در گمانه‌های پیش حفاری‌شده و تزریق دوغاب اجرا می‌شوند، زاویه میخ‌ها کمتر از ۱۵–۱۰ درجه در نظر گرفته نشود. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند میخ‌های یک سوم پایینی عمق دیواره نسبت‌به میخ‌های یک سوم میانی و بالایی تأثیر بیشتری بر ضریب اطمینان کلی دیواره گود دارند.

هر چند تحقیقات زیادی در ارتباط با بهینه‌سازی طرح روش میخ‌گذاری انجام شده‌است، اما در اکثریت آنها فاصله و قطر میخ‌ها در عمق یک‌نواخت فرض شده‌است. این فرض را می‌توان به روش طراحی سنتی برای دیواره‌های میخ‌گذاری‌شده که مبتنی بر راهنمای FHWA است نسبت داد که در آن طول، فاصله و قطر میخ‌ها در عمق گود ثابت است. اما این فرض لزوماً منتهی به طرح بهینه نمی‌شود.

مقاله حاضر یک روش طراحی کاربردی ارائه می‌دهد که در آن طول، فاصله و قطر میخ‌ها می‌تواند در عمق تغییر کند و برای هر ردیف میخ مستقل از سایر ردیف‌ها باشد. ساختار مطالعه حاضر بدین صورت است که ابتدا مفروضات مدل‌سازی بیان می‌شود. سپس روش مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی می‌شود. در ادامه با ذکر یک مثال طراحی، جزئیات روش‌های طراحی سنتی و پیشنهادی بیان و مقایسه می‌شود. در ادامه یک مطالعه پارامتری برای بررسی تأثیر عمق گود، نوع خاک، چسبندگی خاک، سربار و ضریب اطمینان پایداری انجام می‌شود. در مطالعه پارامتری، طرح‌های سنتی و پیشنهادی میخ‌گذاری برای مدل‌های گود از نظر چگالی حجمی و تغییرشکل مقایسه می‌شود. در انتها نیز خلاصه و جمع‌بندی مطالعه ارائه می‌شود.

مفروضات مدل‌سازی

مراحل اصلی طراحی میخ‌گذاری شامل کنترل ضریب

اطمینان پایداری کلی دیواره گود و تغییرشکل آن می‌شود. در مقاله حاضر، از نرم‌افزارهای GEOSLOPE و $FLAC^{3D}$ به‌ترتیب برای محاسبه ضریب اطمینان و تغییرشکل استفاده شده‌است. نرم‌افزار GEOSLOPE یک نرم‌افزار مبتنی بر روش تعادل حدی است که قابلیت محاسبه ضریب اطمینان با روش‌های متفاوت مانند فلنیوس، عمومی جانبو، اسپنسر و... را دارد. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ یک نرم‌افزار مبتنی بر روش تفاضل محدود است که برای حل مسائل در محیط‌های پیوسته به‌کار می‌رود.

در مقاله حاضر از روش اسپنسر و مدل رفتاری موهر–کولمب برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری دیواره گود استفاده شده‌است. تحلیل‌های تغییرشکل با فرض کرنش مسطح انجام شده‌است. برای مدل‌سازی میخ‌ها و شاتکریت به‌ترتیب از المان‌های الاستیک تیر (beam) و پوسته (shell) استفاده شد [11]. برای تحلیل تغییرشکل از مدل رفتاری CYSOIL که یک مدل رفتاری پلاستیک با پوش (کلاهک‌دار) و با کرنش سخت‌شونده است، استفاده شده‌است. پارامترهای اصلی این مدل رفتاری شامل زاویه اصطکاک داخلی (φ)، زاویه اتساع (ψ)، چسبندگی (c) و نسبت پواسون خاک (υ)، توان باربرداری (m) که برای تمامی تحلیل‌های مطالعه حاضر مطابق با پیش‌فرض آن در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ۰/۵ فرض شد، ضریب بیش‌تحکیمی (OCR) که برای تمامی تحلیل‌ها ۱ در نظر گرفته شده‌است (خاک عادی تحکیم‌یافته)، فشار مرجع که در مطالعه حاضر برابر با فشار هوا (P_{ref}=100 kPa) در نظر گرفته شده‌است و پارامترهای G_{ref} و R می‌شوند. پارامترهای G_{ref} و R به‌ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

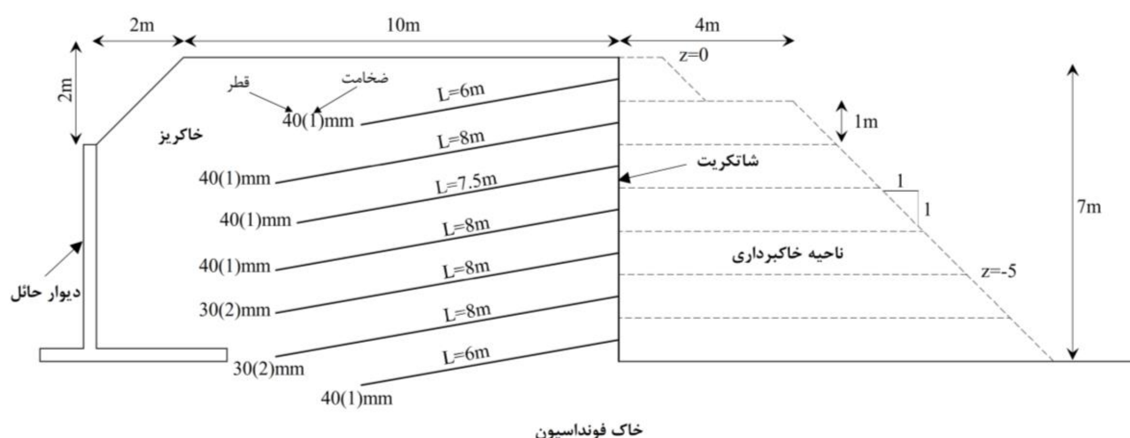
$$G_{ref}=\frac{E_{50}}{P_{ref}}\cdot\frac{(1-2\upsilon)}{2(1-\upsilon)} \quad (1)$$

$$R=\frac{E_{ur}}{E_{50}}\cdot\frac{(1-\upsilon)}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}-1 \quad (2)$$

که E_{50} و E_{ur} به‌ترتیب مدول بارگذاری سکانت در ۵۰٪ مقاومت برشی نهایی و مدول باربرداری– بارگذاری مجدد است. برای تمامی مدل‌های مطالعه حاضر $E_{ur}=3E_{50}$ فرض شده‌است. هم‌چنین مدول برشی حداکثر (G_{max}) و حداقل (G_{min}) خاک نیز در مدل‌رفتاری CYSOIL قابل تعریف است.

صحت‌سنجی

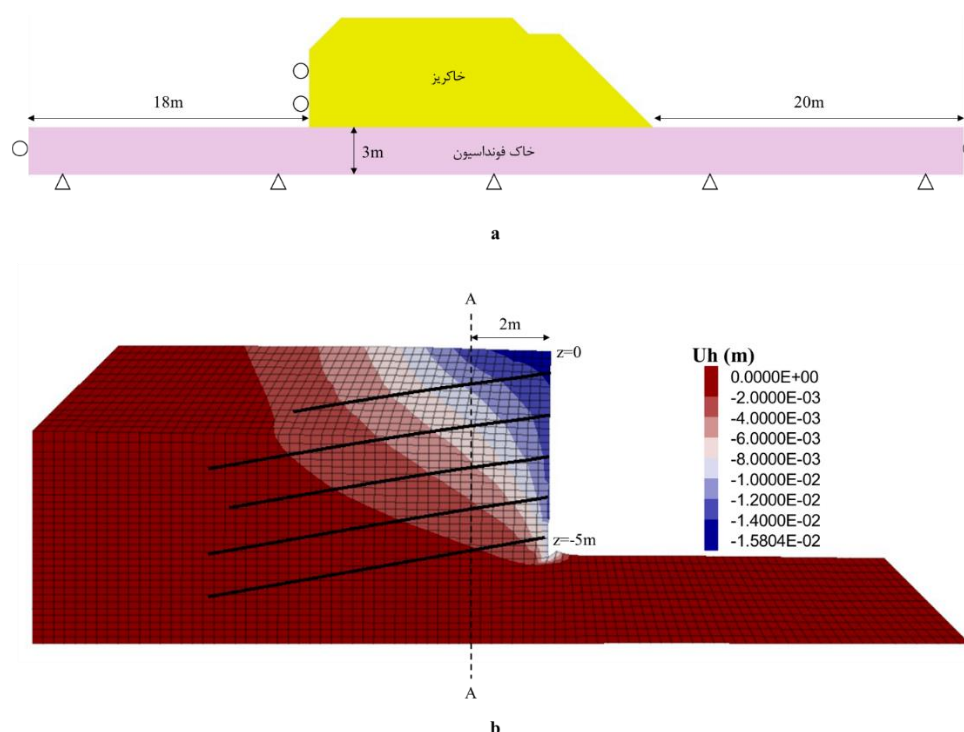
مدل عددی به‌کاررفته در مطالعه حاضر با مدل‌سازی یک آزمون بزرگ‌مقیاس که بر روی یک دیواره میخ‌گذاری‌شده در پروژه کلوتره انجام شده‌است [12]، صحت‌سنجی شد. ارتفاع و عرض (بعد عمود بر صفحه) دیواره میخ‌گذاری شده در پروژه کلوتره به‌ترتیب ۷ m و ۷/۵ m است. برای پایدارسازی خاکریز در این پروژه از ۷ ردیف میخ توخالی آلومینیومی با فاصله قائم و افقی به‌ترتیب ۱ m و ۱/۱۵ m استفاده شده‌است. شکل ۱) هندسه دیواره میخ‌گذاری‌شده و مشخصات ردیف‌های میخ شامل طول، قطر و ضخامت آنها را نشان می‌دهد. یک لایه پوشش شاتکریتی با ضخامت ۸۰ mm بر روی دیواره اجرا شده‌است [12]. در مدل‌سازی عددی، چگالی، مدول الاستیسته و نسبت پواسون شاتکریت (میخ) به‌ترتیب ۲۴۰۰ (۲۷۰۰) kg/m^3، ۲۵ GPa (۷۰) و ۰/۲ (۰/۲) فرض شده‌است. جدول ۱) مشخصات خاکریز و خاک فونداسیون در مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ هندسه دیواره میخ‌گذاری‌شده در پروژه کلوتره [۱۲]

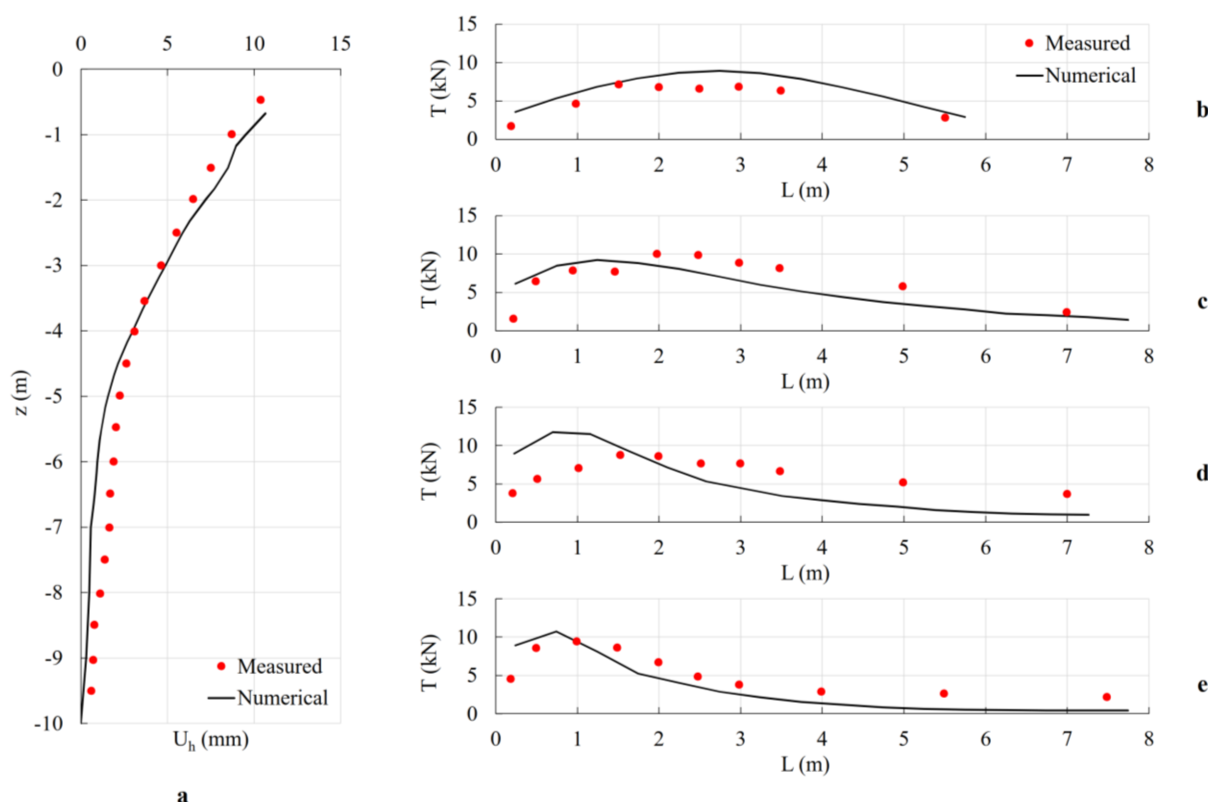
جدول ۱ مشخصات خاک خاکریز و فونداسیون [۱۲]

	خاکریز	خاک فونداسیون
وزن مخصوص (kN/m^3)، γ	۱۶/۱	۱۷/۰
مدول بارگذاری سکانت در ۵۰٪ مقاومت برشی نهایی (MPa)، E_{50}	۲۰	۷۰
مدول برشی حداکثر، G_{max} (MPa)	۷/۵	۲۶/۳
نسبت پواسون، v	۰/۳۳	۰/۳۳
چسبندگی (kPa)، c	۳	۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، φ	۳۸	۳۸
زاویه اتساع (درجه)، ψ	۲۵	۲۰
ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون، K_0	۰/۳۸۴	۰/۳۸۴



شکل ۲ a) مدل عددی پروژه کلوتره، b) کانتور جابه‌جایی افقی خاکریز در انتهای مرحله پنجم خاکبرداری

برای مدل‌سازی عددی پروژه کلوتره، ابتدا هندسه مدل به‌صورتی که در شکل ۲- a) نشان داده شده‌است، ساخته و شرایط مرزی مدل تعریف شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مرز پایینی خاک فونداسیون در دو جهت و مرزهای دو طرف آن در جهت عمود بر صفحه بسته شده‌است. علاوه بر این، با فرض ناچیز و بی‌تأثیر بودن جابه‌جایی دیوار حائل بر نتایج مدل‌سازی، از مدل‌سازی دیوار حائل اجتناب و درعوض حرکت عمود بر صفحه خاکریز در محل دیوار حائل بسته شده‌است. سپس تنش‌های برجا با در نظر گرفتن ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون در مدل ایجاد شد. در ادامه عملیات خاکبرداری، نصب شاتکریت و میخ‌ها به‌صورت گام‌به‌گام تا عمق z=-5m (شکل ۱) انجام شد. شکل ۲- b) کانتور جابه‌جایی افقی (U_h) خاکریز در انتهای مرحله پنجم خاکبرداری را نشان می‌دهد.



شکل ۳ a) پروفیل‌های عددی و اندازه‌گیری‌شده جابه‌جایی افقی در امتداد محور A-A، b تا e: مقایسه نمودارهای عددی و اندازه‌گیری‌شده نیروی کششی میخ برحسب فاصله از سرمیخ

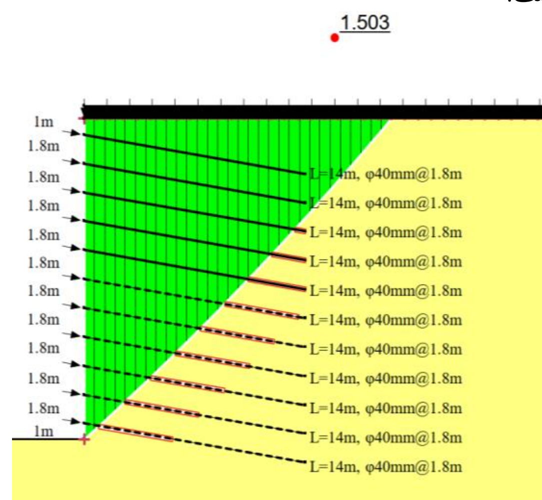
شکل ۳ (a) پروفیل‌های جابه‌جایی افقی اندازه‌گیری‌شده [۱۲] و عددی در امتداد محور A-A (شکل ۲،b) که در فاصله ۲ m از شاتکریت قرار دارد را مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروفیل‌های اندازه‌گیری‌شده و عددی سازگار خوبی با یکدیگر دارند. مقادیر جابه‌جایی افقی اندازه‌گیری‌شده و عددی در تاج دیواره به‌ترتیب حدود ۱۰/٦ mm و ۱۰/٤ mm است که اختلافی حدود ۲٪ دارند. شکل ۳- b) تا شکل ۳- e) به‌ترتیب نمودارهای نیروی کششی اندازه‌گیری‌شده و عددی برحسب فاصله از سرمیخ در میخ‌های اول تا چهارم را مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌سازی عددی روند کلی تغییرات نیروی کششی در طول میخ‌ها را به‌صورت قابل قبولی بازتولید کرده‌است. مقادیر عددی حداکثر نیروی کششی در طول میخ برای میخ‌های اول، سوم و چهارم نسبت‌به مقادیر متناظر اندازه‌گیری‌شده بیشتر اما برای میخ دوم کمتر است. مقادیر عددی (اندازه‌گیری‌شده) حداکثر نیروی کششی میخ‌ها به‌ترتیب ۸/۹ (۷/۱)، ۹/۲ (۱۰)، ۱۱/۷ (۸/۸) و ۱۰/۷ (۹/٤) کیلونیوتن است که به‌ترتیب اختلاف ۲۳٪، ۸٪، ۲۸٪ و ۱۳٪ با یکدیگر دارند.

معرفی روش‌های طراحی سنتی و پیشنهادی

در مطالعه حاضر صرف‌نظر از روش طراحی (سنتی یا پیشنهادی)، زاویه میخ‌ها نسبت‌به افق ۱۰ درجه و فاصله افقی هر ردیف میخ برابر با فاصله قائم آن فرض شده‌است. البته برای یک تا دو ردیف انتهایی میخ (نزدیک به کف گود) ممکن است فاصله قائم با فاصله افقی میخ برابر نباشد. حداقل قطر میلگرد و حداکثر فاصله میخ‌ها مطابق با راهنمای FHWA به‌ترتیب ۲۵ mm و ۲ m در نظر گرفته شده‌است. حداکثر قطر میلگرد و حداقل فاصله میخ‌ها با توجه به شرایط اجرایی ۲×۳۲ mm (دو میلگرد با قطر ۳۲ mm) و ۱ m در نظر گرفته شده‌است. حداکثر طول میخ‌ها در بازه ۰/۷ -۱ H (۰/۷ تا ۱ برابر ارتفاع دیواره گود) فرض

شدهاست. همچنین مطابق با راهنمای FHWA، ضریب اطمینانهای جزئی مقاومت کششی میلگرد و مقاومت بیرونکشش میخ بهترتیب ۱/۸ و ۲ لحاظ شدهاست.

در روش طراحی سنتی، طول، قطر و فاصله میخها در عمق گود ثابت است. طول، قطر و فاصله میخها طوری انتخاب میشود که ضریب اطمینان پایداری موردنیاز برای دیواره گود تامین شود. شکل ۴) طرح میخگذاری براساس روش سنتی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان پایداری FOS=۱/۵ را نشان میدهد. طول، قطر و فاصله میخها در طرح میخگذاری با روش سنتی بهترتیب ۱۴m، ۴۰ mm و ۱/۸ m است. مشخصات خاک مدل γ=۱۷/۸ kN/m^3، E_{50}=۵۷ MPa، ν=۰/۳، φ=۳۶°، ψ=۶°، c=۱۰ kPa، K_0=۰/۴۱۲ و q_u=۴۰۰ kPa (مقاومت نهایی بیرونکشش) است. سربار سطح زمین Q=۱۰ kPa فرض شدهاست.



شکل ۴ طرح میخگذاری با روش سنتی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵

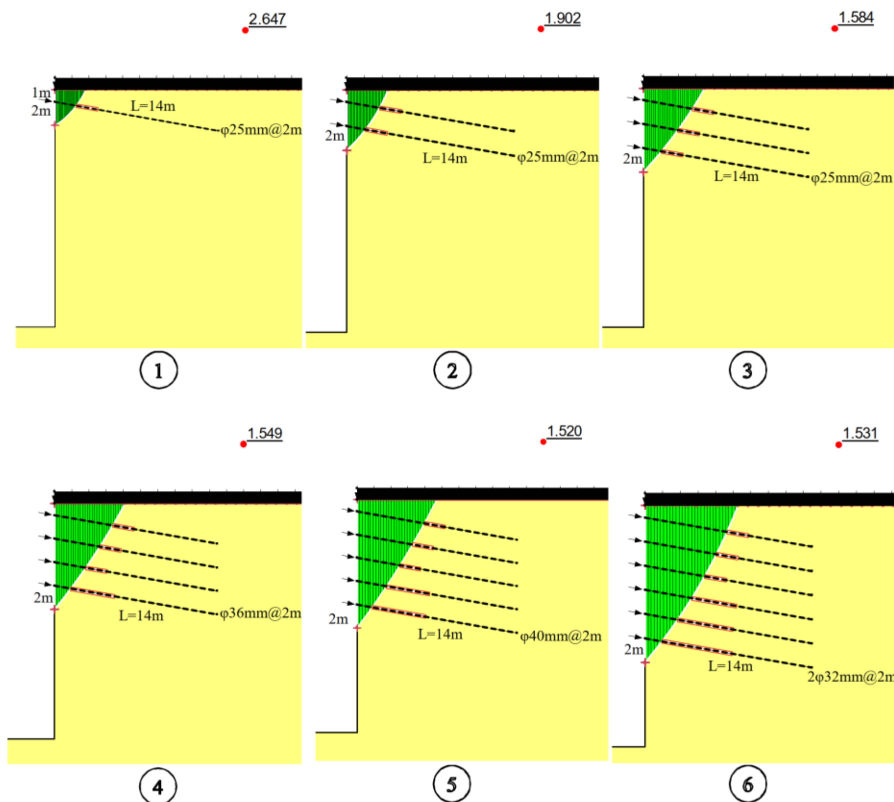
در روش طراحی پیشنهادی برخلاف روش طراحی سنتی، طول، فاصله و قطر میخها در عمق گود میتواند تغییر کند. طراحی میخگذاری با روش پیشنهادی بهصورت گامبهگام از بالا به پایین دیواره گود انجام میشود که بهصورت خلاصه شامل مراحل زیر است:

اولین ردیف میخ نصب میشود. در ابتدا حداقل قطر و حداکثر فاصله (اقتصادیترین حالت) برای آن در نظر گرفته میشود. سپس ضریب اطمینان کنترل میشود. برای کنترل ضریب اطمینان، تنها گوههای لغزشی در نظر گرفته میشود که از پایین محدوده فاصله قائم اولین ردیف میخ (محل نصب ردیف میخ بعدی) عبور میکنند. با کنترل ضریب اطمینان، دو حالت ممکن است رخ دهد: *حالت اول*: ضریب اطمینان از مقدار موردنیاز بزرگتر است. در این حالت، طراحی میخ به پایان میرسد. *حالت دوم*: ضریب اطمینان از حداقل مقدار موردنیاز کوچکتر است. در این حالت با افزایش قطر یا کاهش فاصله میخ یا هر دو، ضریب اطمینان تأمین میشود. اینکه کدام گزینه (افزایش قطر یا کاهش فاصله میخ یا هر دو) برای تقویت طرح میخ انتخاب شود، بستگی به تجربه طراح، شرایط خاک، قضاوت مهندسی، قیمت میلگرد و هزینه اجرای گمانه (حفاری و تزریق) دارد.

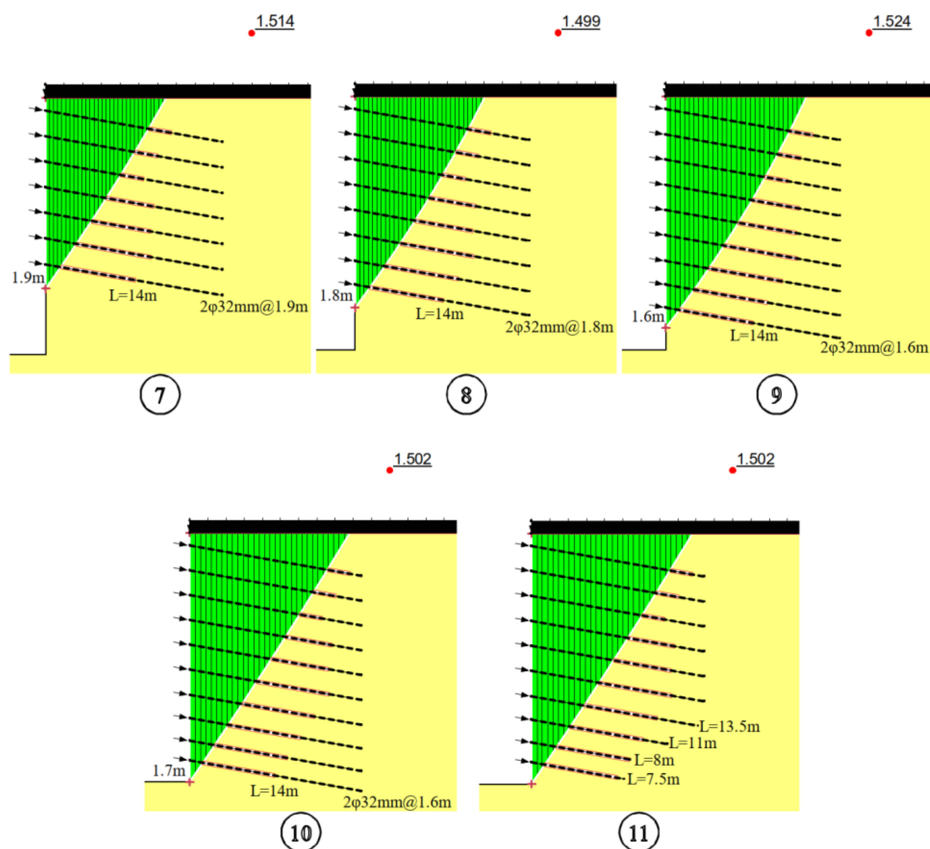
طراحی سایر ردیفهای میخ مشابه اولین ردیف میخ با کنترل ضریب اطمینان پایداری برای هر ردیف و اصلاح طرح آن بهصورت گامبهگام تا کف گود انجام میشود.

در انتها، طولهای اضافی میخهایی که ظرفیت مجاز بیرونکشش (حاصلضرب مقاومت مجاز بیرونکشش در طولی از میخ که پشت گوه گسیختگی قرار دارد) از ظرفیت مجاز کششی میلگرد آنها بزرگتر است، تا حد ممکن کوتاه میشود بهطوریکه ظرفیتهای مجاز بیرونکشش و کششی میلگرد تقریباً برابر شود. البته باید کنترل شود که کوتاه کردن میخها موجب کمتر شدن ضریب اطمینان پایداری از مقدار موردنیاز نشود.

شکل ۵) و شکل ۶) مراحل طراحی میخگذاری براساس روش طراحی پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵ را نشان میدهد. ارتفاع دیواره و مشخصات خاک مشابه مدل قبلی با روش طراحی سنتی است. همانطور که مشاهده میشود، ضرایب اطمینان پایداری برای تمامی ردیفهای میخ از مقدار موردنیاز بزرگتر است. شکل ۷) طرح نهایی میخگذاری با روش پیشنهادی را نشان میدهد. روش طراحی پیشنهادی این امکان را فراهم میآورد که چگالیمیخها در عمق دیواره متناسب با افزایش عمق (افزایش وزن گوه گسیختگی) تنظیم شود. همانطور که مشاهده میشود، با افزایش عمق، قطر میلگرد میخها افزایش و فاصله آنها کاهش مییابد. در ردیفهای بالایی، میخهایی با قطر ۲۵ mm با فاصله ۲ m برای تأمین پایداری دیواره کافی است. اما در ردیفهای پایینی، چگالی میخها افزایش مییابد (میخهای ۲×۳۲ mm با فاصله ۱/۶ m).



شکل ۵ مراحل اول تا ششم طراحی میخ‌گذاری براساس روش پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵

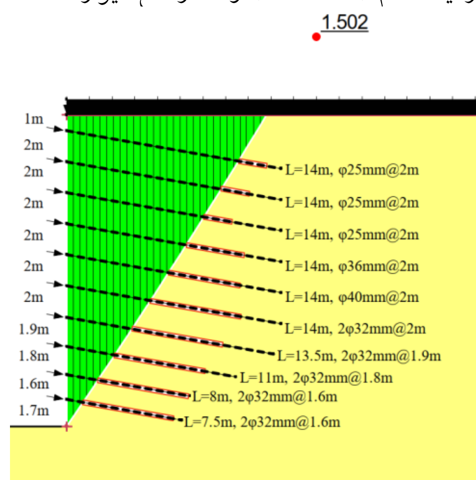


شکل ٦ مراحل هفتم تا یازدهم طراحی میخ‌گذاری براساس روش پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵

توزیع بهینه میخ‌ها متناسب با عمق در روش طراحی پیشنهادی موجب اقتصادی‌تر شدن طرح میخ‌گذاری در مقایسه با روش طراحی سنتی می‌شود. به‌منظور مقایسه اقتصادی طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش سنتی و پیشنهادی، چگالی حجمی (مجموع حجم میخ‌ها تقسیم بر مساحت دیواره گود) این دو طرح مقایسه می‌شود. چگالی حجمی (D_V) برای یک طرح میخ‌گذاری به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_V = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i A_i / S_{h(i)}}{H} \qquad (۳)$$

که در رابطه بالا، n تعداد ردیف میخ، L_i: طول میخ‌های ردیف i ام، $S_{h(i)}$: فاصله افقی میخ‌های ردیف i ام، A_i: سطح مقطع میخ‌های ردیف i ام ($A_i=\pi d_i^2/4$) و H ارتفاع دیواره است.



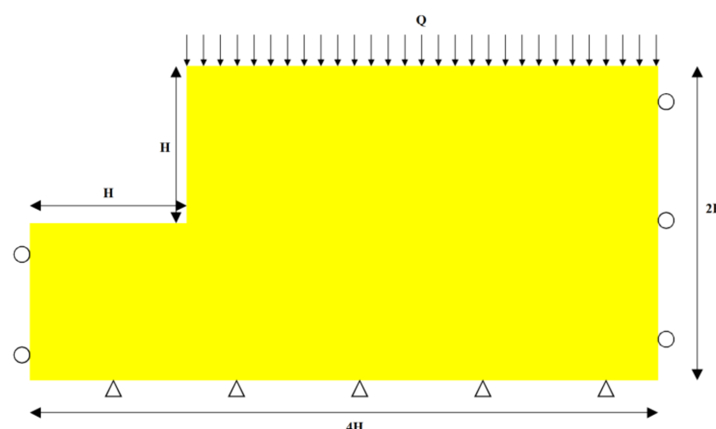
شکل ۷ طرح میخ‌گذاری با روش پیشنهادی برای یک دیواره ۲۰ m با ضریب اطمینان ۱/۵

با استفاده از رابطه بالا، چگالی‌های حجمی طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش طراحی سنتی و پیشنهادی به‌ترتیب ۰/۰۰٥٤ و ۰/۰۰۳۷ به‌دست می‌آید. بنابراین روش طراحی پیشنهادی نسبت‌به روش سنتی موجب کاهش ۳۱٪ چگالی حجمی طرح میخ‌گذاری شده‌است که از لحاظ اقتصادی قابل توجه است.

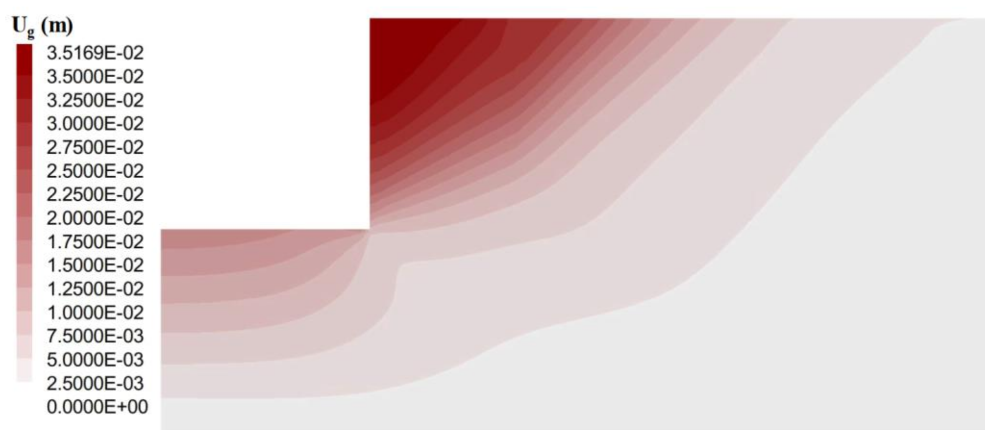
برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین [۹-۲] که تنها فاکتور ضریب اطمینان را در بهینه‌سازی طرح میخ‌گذاری در نظر گرفتند، مطالعه حاضر به فاکتور تغییرشکل نیز توجه داشته‌است. در تحلیل تغییرشکل، مدول الاستیسته مصالح میخ و شاتکریت به‌ترتیب ۲۰۰ GPa و ۲۰ GPa و نسبت پواسون آنها به‌ترتیب ۰/۲ و ۰/۱۵ فرض شد. شکل ۸) هندسه مدل گود و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. ابعاد مدل و چگالی مش براساس [۱۳] انتخاب شده‌است. مراحل مدل‌سازی تحلیل تغییرشکل بدین صورت بود که ابتدا تنش‌های برجا داخل محیط خاکی ایجاد شد. در ادامه خاک موجود در ناحیه خاکبرداری به‌صورت گام به گام با حداکثر ارتفاع ۲ متر تا کف گود برداشته و نیل‌های موجود در محدوده هر پانل خاکبرداری‌شده نصب شد.

شکل ۹) و شکل ۱۰) به‌ترتیب کانتورهای جابه‌جایی کل دیواره گود برای طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش سنتی و پیشنهادی را نشان می‌دهد. مقادیر جابه‌جایی کل در تاج دیواره گود برای این طرح‌ها به‌ترتیب ۳۵ mm و ۳٦ است که تقریباً برابرند.

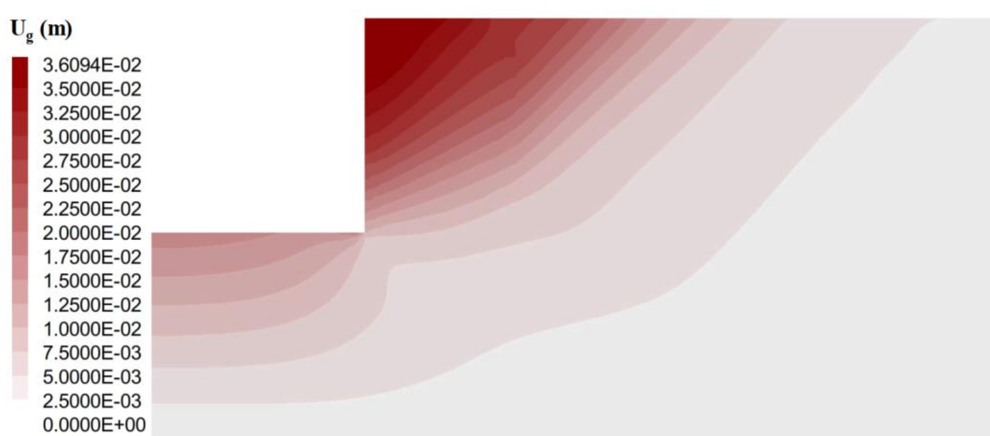
در مجموع مقایسه طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش سنتی و پیشنهادی برای مدل در نظر گرفته نشان می‌دهد روش طراحی پیشنهادی علی‌رغم کاهش قابل توجه طول حفاری و وزن میلگرد مصرفی (اقتصادی کردن طرح میخ‌گذاری) چندان موجب افزایش تغییرشکل دیواره گود نیز نمی‌شود.



شکل ۸ ابعاد و شرایط مرزی مدل گود در مطالعه پارامتری



شکل ۹ کانتور تغییرشکل کل برای طرح میخ‌گذاری با روش سنتی برای دیواره ۲۰ m



شکل ۱۰ کانتور تغییرشکل کل برای طرح میخ‌گذاری با روش پیشنهادی برای دیواره ۲۰ m

جدول ۲ جزئیات مطالعه پارامتری

نوع خاک	c (kPa)	H (m)	Q (kPa)	FOS
شل، متوسط و متراکم	۱۰	**۱۰**	۱۰	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	۱۰	**۱۵**	۱۰	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	۱۰	**۲۰**	۱۰	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	**۲۰**	۱۵	۱۰	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	**۳۰**	۱۵	۱۰	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	۱۰	۱۵	**۲۰**	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	۱۰	۱۵	**٤۰**	۱/۵
شل، متوسط و متراکم	۱۰	۱۵	۱۰	**۱/۳۵**
شل، متوسط و متراکم	۱۰	۱۵	۱۰	**۲**

جدول ۳ مشخصات انواع خاک مورداستفاده در مطالعه پارامتری

نوع خاک	γ (kN/m^3)	φ^o	q_u (kPa)	E_{50} (MPa)
شل	۱۶/۶	۳۰	۲۰۰	۳۰
متوسط	۱۷/۸	۳۶	۴۰۰	۵۷
متراکم	۱۸/۷	۴۱	۶۰۰	۹۰

به‌منظور دستیابی به طرح بهینه در هر یک از روش‌های طراحی (سنتی یا پیشنهادی)، مراحل طراحی این روش‌ها مطابق با توضیحات بخش قبل در قالب دو برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد. با ایجاد یک لینک میان نرم‌افزارهای MATLAB و GEOSLOPE، از قابلیت نرم‌افزار GEOSLOPE برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری دیواره استفاده شد. ایجاد این لینک را می‌توان از نوآوری‌های مطالعه حاضر دانست. در برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده، متغیرهای طراحی شامل طول، قطر و فاصله میخ‌ها با استفاده از یک دستور حلقه تغییر داده شد تا طرح‌های بهینه با کمینه کردن چگالی حجمی طرح میخ‌گذاری (D_v) به‌دست آید. بدین‌ترتیب یک طرح بهینه براساس روش طراحی سنتی و یک طرح بهینه براساس روش طراحی پیشنهادی برای هر مدل به‌دست آمد (درمجموع ۵۴ طرح بهینه با دو روش سنتی و پیشنهادی برای تمامی مدل‌ها در جدول ۲). جدول ۴ دامنه تغییرات متغیرهای طراحی شامل طول، قطر و فاصله میخ را نشان می‌دهد. در انتها تحلیل‌های تغییرشکل طرح‌های بهینه با دو روش سنتی و پیشنهادی (درمجموع ۵۴ تحلیل تغییرشکل) با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام شد.

جدول ۴ دامنه تغییرات متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی	دامنه تغییرات
طول میخ	H ۰/۷، H ۰/۸، H ۰/۹ و H ۱
قطر میخ	mm ۲۵، ۳۲، ۳۶، ۴۰ و ۲×۳۲
فاصله میخ	m ۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۷، ۱/۸، ۱/۹ و ۲

نتایج و بحث

به‌منظور مقایسه طرح‌های سنتی و پیشنهادی از منظرهای چگالی حجمی و تغییرشکل، از دو کمیت اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل استفاده می‌شود. اختلاف چگالی حجمی به‌صورت درصد (٪) کاهش چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت‌به طرح سنتی تعریف می‌شود. بدیهی است هر چه اختلاف چگالی حجمی بیشتر باشد، بدین معنی است که طرح پیشنهادی نسبت‌به طرح سنتی اقتصادی‌تر است. *نسبت* تغییرشکل برابر با نسبت تغییرشکل کل تاج دیواره گود در طرح پیشنهادی به مقدار متناظر آن در طرح سنتی تعریف می‌شود. در مطالعه حاضر، نسبت تغییرشکل همواره بزرگ‌تر از یک است. به‌عنوان مثال، اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای مدل نشان داده شده در بخش قبل به‌ترتیب برابر با ٪۳۱=۰/۰۰۵۴/(۰/۰۰۳۷-۰/۰۰۵۴) و ۱/۰۳=۳۶/۳۵ است.

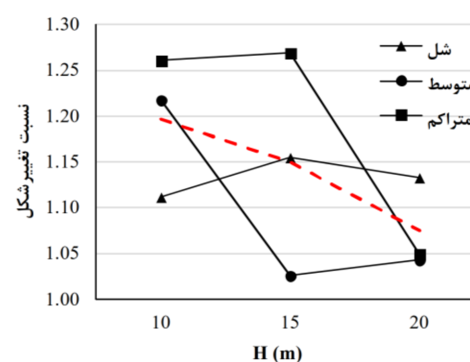
شکل ۱۱) تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش عمق گود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱- a) مشاهده می‌شود، صرف‌نظر از نوع خاک، اختلاف چگالی حجمی با افزایش عمق گود افزایش می‌یابد. با افزایش عمق گود از m ۱۰ به ۲۰، اختلاف چگالی حجمی برای خاک شل از ٪۲۴ به ٪۳۶، خاک متوسط از ٪۲۸ به ٪۳۸ و برای خاک متراکم از ٪۱۲ به ٪۴۳ افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات در خاک متراکم رخ داده‌است. همان‌طور که دیده می‌شود، اختلاف چگالی حجمی برای عمق‌های m ۱۵ و ۲۰ با افزایش تراکم خاک افزایش می‌یابد. اما برای عمق m ۱۰، ابتدا با تغییر نوع خاک از شل به متوسط افزایش و سپس با تغییر نوع خاک از متوسط به متراکم به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد.

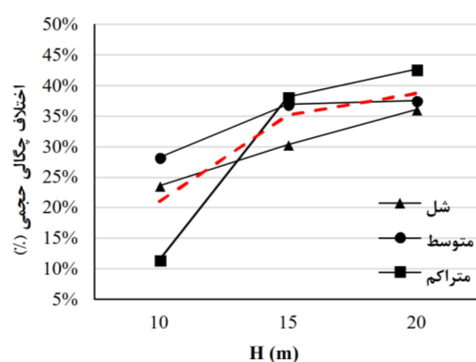
همان‌طور که در شکل ۱۱- b) نشان داده شده‌است، بر خلاف اختلاف چگالی حجمی، روند تغییرات نسبت تغییرشکل با افزایش ارتفاع گود ثابت نیست. برای خاک شل، تقریباً نسبت تغییرشکل با افزایش ارتفاع گود ثابت می‌ماند. برای خاک متوسط، با افزایش ارتفاع گود از m ۱۰ به ۱۵، نسبت تغییرشکل از ۱/۲۲

به ۱/۰٤ کاهش می‌یابد و سپس تقریباً ثابت می‌ماند. برای خاک متراکم، با افزایش ارتفاع گود از ۱۰ m به ۱۵، نسبت تغییرشکل ثابت می‌ماند و سپس با افزایش آن از ۱۵ m به ۲۰، از ۱/۲٦ به ۱/۰۵ کاهش می‌یابد.

میانگین اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با خطچین در شکل ۱۱) نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق گود از ۱۰ m به ۲۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۲۱٪ به ۳۹٪ افزایش و میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۲۰ به ۱/۰۸ کاهش می‌یابد.

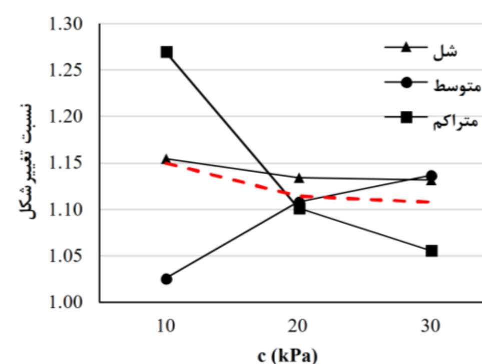
شکل ۱۲) تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش چسبندگی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲– a) دیده می‌شود، برای خاک شل، با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۲۰، اختلاف چگالی حجمی از ۳۰٪ به حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند. برای خاک متوسط، ابتدا با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۳۰، اختلاف چگالی حجمی از ۳۷٪ به ٤۳٪ افزایش و سپس با افزایش چسبندگی از ۲۰ kPa به ۳۰، به‌صورت قابل توجهی از ٤۳٪ به ۸٪ کاهش می‌یابد. برای خاک متراکم، با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۳۰، اختلاف چگالی حجمی به‌صورت پیوسته از ۳۸٪ به ۱۵٪ کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۲– b) مشاهده می‌شود، نسبت تغییرشکل برای خاک شل با افزایش چسبندگی تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش چسبندگی از ۱۰ kPa به ۳۰، نسبت تغییرشکل برای خاک متوسط از ۱/۰۳ به ۱/۱٤ افزایش و برای خاک متراکم از ۱/۲۷ به ۱/۰٦ کاهش می‌یابد. با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ kPa به ۳۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۳۵٪ به ۱٦٪ و میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۵ به ۱/۱۱ کاهش می‌یابد.

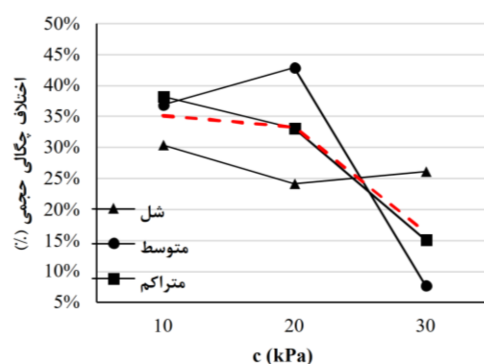




شکل ۱۱ تغییرات a) اختلاف چگالی حجمی و b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش عمق گود

(FOS=۱/۵ و Q=۱۰ kPa ،c=۱۰ kPa)



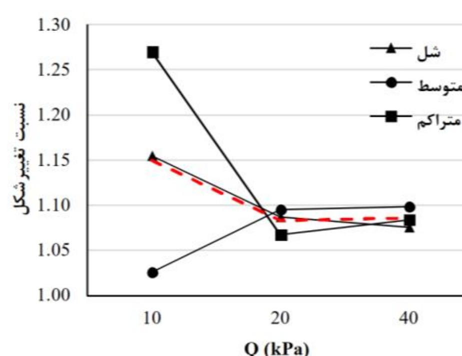


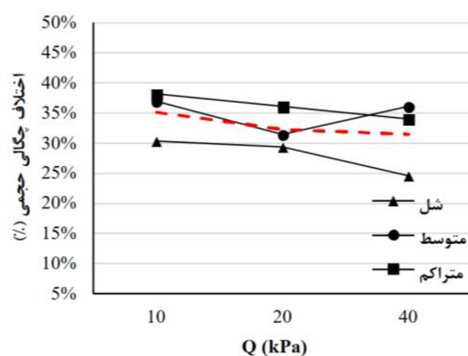
شکل ۱۲ تغییرات a) اختلاف چگالی حجمی و b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش چسبندگی خاک

(FOS=۱/۵ و Q=۱۰ kPa ،H=۱۵ m)

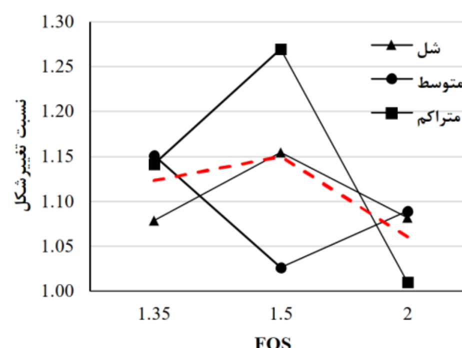
شکل ۱۳) تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش سربار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳– a) مشاهده می‌شود، صرف‌نظر از مدل خاک متوسط با سربار ۴۰ kPa، اختلاف چگالی حجمی با افزایش سربار به‌صورت جزئی کاهش می‌یابد. با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۴۰، اختلاف چگالی حجمی برای خاک شل از ۳۰٪ به ۲۵٪ و برای خاک متراکم از ۳۸٪ به ۳۴٪ کاهش می‌یابد. برای انواع خاک، با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۲۰، نسبت تغییرشکل کاهش و سپس تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۴۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۳۵٪ به ۳۲٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ۲۰، میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۵ به حدود ۱/۰۸ کاهش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند.

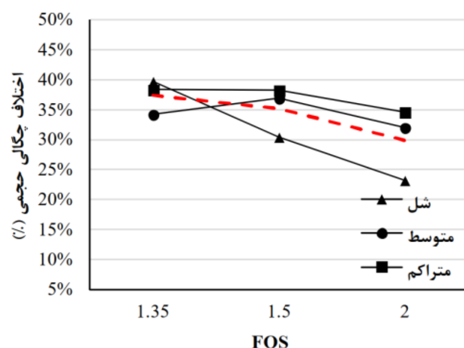
شکل ۱۴) تغییرات اختلاف چگالی حجمی و نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش ضریب اطمینان طراحی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۴– a) مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۲، اختلاف چگالی حجمی برای خاک شل از ۴۰٪ به ۲۳٪ و برای خاک متراکم از ۳۸٪ به ۳۵٪ کاهش می‌یابد. برای خاک متوسط، با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۱/۵، اختلاف چگالی حجمی از ۳۴٪ به ۳۷٪ افزایش و سپس با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۵ به ۲، اختلاف چگالی حجمی از ۳۷٪ به ۳۲٪ کاهش می‌یابد. افزایش ضریب اطمینان بیشترین تأثیر را برای خاک شل دارد. با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۱/۵، نسبت تغییرشکل برای خاک شل از ۱/۰۸ به ۱/۱۵ و برای خاک متراکم از ۱/۱۴ به ۱/۲۷ افزایش می‌یابد اما برای خاک متوسط، از ۱/۱۵ به ۱/۰۳ کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۵ به ۲، نسبت تغییرشکل برای خاک شل از ۱/۱۵ به ۱/۰۸ و برای خاک متراکم از ۱/۲۷ به ۱/۰۱ کاهش می‌یابد اما برای خاک متوسط، از ۱/۰۳ به ۱/۰۹ افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب اطمینان، میانگین اختلاف چگالی حجمی از ۳۷٪ به ۳۰٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۳۵ به ۱/۵، میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۲ به ۱/۱۵ افزایش و سپس با افزایش ضریب اطمینان از ۱/۵ به ۲، میانگین نسبت تغییرشکل از ۱/۱۵ به ۱/۰۶ کاهش می‌یابد.





شکل ۱۳ تغییرات a) اختلاف چگالی حجمی و b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش سربار (H=۱۵ m، c=۱۰ kPa و FOS=۱/۵)





شکل ۱۴ تغییرات a) اختلاف چگالی حجمی و b) نسبت تغییرشکل برای انواع خاک با افزایش ضریب اطمینان طراحی

(H=۱۵ m، c=۱۰ kPa و Q=۱۰ kPa)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر یک روش طراحی برای دیواره‌های میخ‌گذاری‌شده ارائه می‌دهد. در روش طراحی پیشنهادی برخلاف روش طراحی سنتی، طول، قطر و فاصله میخ‌ها می‌تواند تغییر کند. در روش طراحی پیشنهادی، طراحی ردیف‌های میخ به‌صورت گام‌به‌گام از بالا به پایین و با کنترل ضریب اطمینان پایداری برای هر کدام از ردیف‌های میخ انجام می‌شود.

در مطالعه حاضر، ابتدا با انجام یک آزمون صحت‌سنجی، مفروضات و روند مدل‌سازی عددی اعتبارسنجی شد. سپس یک مطالعه پارامتری جامع با تغییر در نوع خاک، عمق گود، چسبندگی خاک، سربار و ضریب اطمینان پایداری شامل ۲۷ مدل انجام شد. در این مطالعه پارامتری، ابتدا طرح‌های میخ‌گذاری با دو روش طراحی سنتی و پیشنهادی برای تمامی مدل‌ها بدست آمد (مجموعاً ٥٤ طرح میخ‌گذاری). برای بهینه‌سازی طرح‌ها و هم‌چنین رفع خطای انسانی در پروسه طراحی، دو برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار MATLAB برای طراحی میخ‌گذاری با روش‌های سنتی و پیشنهادی پیاده‌سازی شد. در این برنامه‌های کامپیوتری، یک لینک میان نرم‌افزارهای MATLAB و GEOSLOPE برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری دیواره ایجاد شد که از نوآوری‌های مطالعه حاضر محسوب می‌شود. سپس تحلیل‌های تغییرشکل مدل‌های گود با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ انجام شد.

نتایج مهم مطالعه حاضر عبارتند از:

۱- روش طراحی پیشنهادی نسبت‌به سنتی، چگالی حجمی (مجموع حجم میلگردها تقسیم بر سطح دیواره گود) طرح میخ‌گذاری را از ۸٪ تا ۴۳٪ (به‌طور متوسط ۳۰٪ برای تمامی مدل‌ها در مطالعه پارامتری) کاهش داد که از لحاظ اقتصادی قابل توجه است.

۲- روش طراحی پیشنهادی نسبت‌به سنتی تغییرشکل کل تاج دیواره گود را از ۱٪ تا ۲۷٪ (به‌طور متوسط ۱۱٪ برای تمامی مدل‌ها در مطالعه پارامتری) افزایش داد. این بدین معنی است که روش طراحی پیشنهادی با حفظ ضریب اطمینان پایداری و علی‌رغم کاهش قابل توجه طول حفاری و وزن میلگرد مصرفی، چندان موجب افزایش تغییرشکل دیواره گود نمی‌شود.

۳- صرف‌نظر از نوع خاک، با افزایش عمق گود از ۱۰ m به ۲۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت‌به سنتی از ۲۱٪ به ۳۹٪ افزایش می‌یابد. هم‌چنین نسبت تغییرشکل آنها (تغییرشکل کل تاج دیواره گود در طرح پیشنهادی نسبت‌به سنتی) از ۱/۲۰ به ۱/۰۸ کاهش می‌یابد.

٤- با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ kPa به ۳۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت‌به سنتی از ۳۵٪ به ١٦٪ و میانگین نسبت تغییرشکل آنها از ۱/۱۵ به ۱/۱۱ کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش سربار از ۱۰ kPa به ٤۰، میانگین اختلاف چگالی حجمی طرح پیشنهادی نسبت‌به سنتی از ۳۵٪ به ۳۲٪ و میانگین نسبت تغییرشکل آنها از ۱/۱۵ به حدود ۱/۰۸ کاهش می‌یابد.

در مجموع مطالعه حاضر نشان داد روش طراحی پیشنهادی یک روش طراحی ساده، کابردی و اقتصادی است که می‌تواند برای طراحی دیواره‌های میخ‌گذاری‌شده مورداستفاده قرار گیرد. در روش طراحی سنتی، چگالی حجمی میخ‌ها در عمق ثابت است، اما در روش طراحی پیشنهادی، چگالی حجمی میخ‌ها در عمق گود متناسب با افزایش عمق و وزن گوه گسیختگی بازتوزیع و موجب اقتصادی‌تر شدن آن نسبت‌به روش طراحی سنتی می‌شود. البته تغییرشکل‌های گود در روش طراحی پیشنهادی نسبت‌به سنتی به مقدار کمی افزایش می‌یابد که باید در طراحی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

1. Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G., "Seismic stability analysis of reinforced slopes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 159-172, (2000).
2. Arvin, M.R., Ghavami, E., and Azari, M.M., "Optimization of Nail Inclination Angle in Soil Nail Walls Based on a

Prevalent Limit Equilibrium Method", *Indian Geotechnical Journal*, Vol. pp. 20.

3. Cheuk, C.Y., Ho, K.K.S., and Lam, A.Y.T., "Influence of soil nail orientations on stabilizing mechanisms of loose fill slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, pp. 1236-1249, (2013).
4. Derghoum, R. and Meksaouine, M., "Numerical study for optimal design of soil nailed embankment slopes", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 12, pp. 18, (2021).
5. Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K., and Elias, V., "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil- Nailed Structures", *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, Vol. 116, pp. 54-72, (1990).
6. Yazdi, J.S., Rahman, M.M., and Cameron, D.A., "Effect of nail layout variability on soil nailed wall analysis", *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, (2014).
7. Sabhahit, N., Basudhar, P.K., and Madhav, M.R., "A generalized procedure for the optimum design of nailed soil slopes", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 19, pp. 437-452, (1995).
8. Patra, C.R. and Basudhar, P.K., "Optimum design of nailed soil slopes", 4th International Symposium on Landmarks in Earth Reinforcement, Fukuoka, Japan, A a Balkema Publishers, (2001).
9. Ortigao, J.A.R. and Palmeira, E.M., "Optimised design for soil nailed walls", 3rd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Inst Civil Engineers, London, England, Thomas Telford Services Ltd, (1997).
10. Fan, C.C. and Luo, J.H., "Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes", *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp. 585-599, (2008).
11. FLAC3D, fast Lagrangian analysis of continua, Ver. 7, Itasca consulting group, Minneapolis, (2020).
12. Unterreiner, P., Schlosser, F., and Benhamida, B., "Calculation of the displacements of a full scale experimental soil nailed wall-French National Research Project Clouterre", The practice of soil reinforcing in Europe: Proceedings of the symposium The practice of soil reinforcing in Europe organised by the Tenax Group under the auspices of the International Geosynthetics Society, and held at the Institution of Civil Engineers on 18 May 1995, Thomas Telford Publishing, (1995).
13. Khodaverdian, S., Hazeghian, M., and Mokhtari, M., "Three-dimensional Numerical Study of the Effect of Convex Corners on the Displacements Induced by Excavation for Soil-Nailed Walls", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 53, pp. 7-7, (2021).